

基于 Radarsat-1 数据的北极海冰 SAR 图像自动分割研究

赵庆平^{1a}, 于力刚^{1b}, 王 耀², 张馨月²

(1. 淮北师范大学 a. 物理与电子信息学院, b. 实验室与设备管理处, 安徽 淮北 235000; 2. 塔斯马尼亚大学 信息技术与系统学院, 澳大利亚 塔斯马尼亚 7005)

摘要: 基于 Radarsat-1 数据提出了一种集成 Gibbs 采样标记步骤的北极海冰 SAR 图像分割算法, 该算法综合考虑了斑点噪声、纹理特征等不确定因素, 经由像素到区域再到大尺度区域这一途径, 把区域化标识、Gibbs 采样标记以及区域合并等操作组合起来, 实现对海冰 SAR 图像的分割, 针对 S. Laurence Bay 和 Beaufort 海冰图像的测试实验表明, 与基于区域的 MRF 分割算法相比提出的算法可有效提高图像分割的准确性。

关键词: SAR 海冰图像; 图像分割; Radarsat-1 数据; Gibbs 采样标记

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2018)06-0013-05

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2018.06.004

Automatic SAR Image Segmentation of Arctic Sea Ice Based on Radarsat 1 Data

ZHAO Qing-ping^{1a}, YU Li-gang^{1b}, WANG Yao², ZHANG Xin-yue²

(1a. School of Physics and Electronic Information; 1b. Department of Laboratory and Equipment, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China; 2. School of Information Technology and System, University of Tasmania, Tasmania 7005, Australia)

Abstract: Based on Radarsat-1 data, the authors propose a SAR image segmentation algorithm for Arctic sea ice that integrates Gibbs sampling steps. This method considers the uncertainties of speckle noise and texture features, and combines the regionalization mark, Gibbs sampling, and region merging together via pixel, region and larger-scale region. It successfully segmented the SAR image of Arctic sea ice. Experiments on S. Laurence Bay and Beaufort sea ice images show that the proposed method can effectively improve the segmentation accuracy, compared with the region-based MRF algorithm.

Key Words: image of SAR sea ice; image segmentation; Radarsat 1 data; Gibbs sampling

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(6120327); 安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2016A650, KJ2016A628)

作者简介: 赵庆平(1972-), 男, 辽宁阜新人, 副教授, 硕士, 主要从事图像与信息处理研究。

0 引言

随着全球气候变暖,对于极地海冰的研究得到了越来越多的关注。海冰监测对气候变化研究和航行安全保障具有重要意义。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar SAR)是海冰监测的有效工具,它是一种能产生高分辨率遥感图像的主动式微波传感器,具有全天时、全天候、多波段、穿透力强等特点^[1],现已经得到了广泛的应用。海冰 SAR 图像的分割是图像处理(解译)的重要环节,加拿大冰署(CIS)的海冰分析员曾对 Radarsat-1/2 所提供的大量的海冰 SAR 图像进行处理,制作冰况图,以反映海冰的密集度、类型和尺寸等信息,但由于当时缺少有效的业务化分割工具,只能由海冰分析员对图像进行人工分割,而人工分割费时耗力,且其精确度和分辨率均是有限的^[2]。因此,实现海冰 SAR 图像的自动分割变得尤为重要。

为了满足海冰 SAR 图像分割的实时性要求,计算机视觉技术在此领域得到了重要应用。目前已提出的海冰图像分割方法中普遍采用了提取 SAR 图像的纹理特征描述海冰的方法^[3-5],纹理特征提取方法主要包括灰度共生矩阵、Gabor 变换、小波变换和马尔科夫随机场模型等。和强度特征相比,纹理特征通过描述像素的位置分布特性能够更好地实现海冰 SAR 图像分割。

基于 Radarsat-1 数据,本文提出了一种集成 Gibbs 采样标记步骤的海冰 SAR 图像分割算法,该方法经由像素到区域再到大尺度区域这一途径,把区域化标识、Gibbs 采样标记以及区域合并等操作组合起来,以有效提高分割算法的准确度。

1 分割算法

假设把图像分为 n (冰)类, S 是栅格上的一组位置, $s \in S$ 是栅格中的某个位置。

图像分割是把原始图像转换成符号,即

$$\mathcal{R}: \{I_s | s \in S\} \rightarrow \{x_s | s \in S\}. \quad (1)$$

通过这种方式图像空间被划分成 n 个分割段 $\Omega_1, \dots, \Omega_n$, 得到

$$a) \Omega_i = \{s | x_s = i, s \in S\},$$

$$b) \bigcup_{i=1}^n \Omega_i = S, \quad (2)$$

$$c) \forall i \neq j: \Omega_i \cap \Omega_j = \phi.$$

在上面的定义中,任一 Ω_i 可以是单个区域,也可以是一个不相邻区域集合(区域集群)。每个区域中的像素具有相同的类标记。

图 1 为算法流程图,图中虚线给出了本文所提方法的主要步骤,包括:预处理、区域化表示、计算区域特征、Gibbs 采样标记和区域合并。实线代表了未包括 Gibbs 采样标记步骤的分割流程,称之为基于区域的 MRF (Markov Random Field, MRF) 图像分割算法。

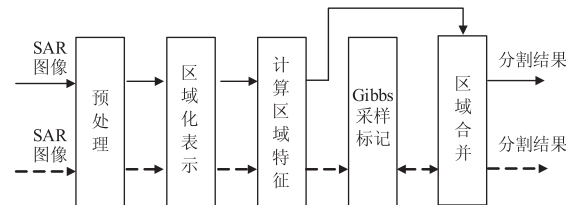


图 1 算法流程图

1.1 预处理及区域化表示

由于 SAR 图像受相干斑噪声的影响,如果直接进行分水岭分割,过分割现象比较严重,影响后续的分割与分类的准确性。因此,在分水岭分割之前需进行 SARD 滤波^[6],在保持地物边界的同时能够有效地抑制过分割现象,减少分割时间。SARD 滤波是将各向异性扩散引入传统的自适应相干滤波器,构造偏微分方程来消除 SAR 图像的相干斑噪声。区域化表示的目的是消除雷达图像的噪声影响,并识别显著的同质区域。具体步骤为:

对滤波结果进行分水岭分割^[7],获得大量同质区域,每个区域 v 由一组属于该区域的位置 S_v 构成,通过把各位置的特征矢量 $\{y_s | s \in S_v\}$ 平均到每一个区域的特征矢量 y_v 上,可以有效降低斑点噪声,此过程称为结构去噪。接下来构建区域邻接图(RAG)^[8],在 RAG 中,每个结点代表一个区域,结点之间的弧表示相邻区域之间的共同边界。分水岭分割及 RAG 表示的示意图如图 2 所示,其中, $U(x)$ 表示区域的一元属性, $U(x, y)$ 表示邻接区域之间的二元属性。

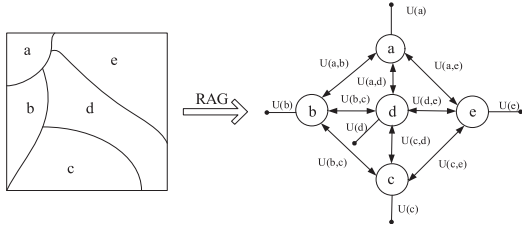


图 2 区域邻接图构建示意图

1.2 计算区域特征

假设特征模型服从高斯分布,则矢量 y_s 的分布是 n 个高斯函数的混合,这里 n 是类的数量。通过期望最大化(EM)算法求解高斯混合模型的参数^[2]。

根据给定的观察数据和所有参数的当前估计,假设 π_i 代表类 Ω_i 的先验, ω_{si} 表示位置 s 属于类 Ω_i 的概率。EM 算法通过计算 E 步骤进行迭代:

$$\omega_{si} = \frac{p(y_s | \mu_i, \sum_i) \pi_i}{\sum_i p(y_s | \mu_i, \sum_i) \pi_i} \quad (3)$$

迭代 M 步骤:

$$\mu_i = \frac{\sum_{s \in S} \omega_{si} y_s}{\sum_{s \in S} \omega_{si}} \quad (4)$$

$$\sum_i = \frac{\sum_{s \in S} \omega_{si} (y_s - \mu_i)^T (y_s - \mu_i)}{\sum_{s \in S} \omega_{si}} \quad (5)$$

$$\pi_i = \frac{\sum_{s \in S} \omega_{si}}{\sum_i \sum_{s \in S} \omega_{si}} \quad (6)$$

经由上述 EM 算法获得的参数就是初始使用的参数。在每一次迭代中进一步更新参数,使用 M 步骤计算参数。在本文中对大量不同初始值进行了随机选择,在少量迭代后,选择具有最小能量的值,并经由更多次迭代进行细化,以获得最终解。

1.3 Gibbs 采样标记

Gibbs 采样标记的目的是要找出每个分水岭区域的最优标记,这是通过找出标记的配置来完成的。最小化的成本函数表示如下:

$$\arg \min_{(l_i, s \in S)} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{s \in R_i} \left\{ \frac{1}{2} \ln(2\pi\sigma_i^2) + \frac{(y_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\} + \beta \sum_{\substack{s, t \in R_i \\ s \in R_i, t \in R_j}} \{ (1 - \delta(l_s, l_t)) g(\nabla_{st}) \} \right\} \quad (7)$$

其中, R_i 表示第 i 个区域; l_s 表示区域 R_i 的类别标号; μ_{ls} 和 σ_{ls} 表示区域 R_i 内所有像素的均值和标准差; C 表示双位团邻域系统; $g(\nabla_{st})$ 表示边界强度函数,即边界惩罚函数;点 s 和点 t 组成属于不同类别的邻接区域的共享边界的点对。

1.4 区域合并

在每次迭代的同时进行区域合并的操作,减少了区域的数目,降低了优化过程最优解的搜索空间,提高了运算速度。邻接区域可以合并的条件如下:

$$\delta E = \sum_{s \in R_i} \ln(\sigma_k) - \sum_{s \in R_i} \ln(\sigma_i) - \sum_{s \in R_j} \ln(\sigma_j) - \beta \sum_{\substack{s \in NR_i, t \in NR_j \\ t \in \eta_s}} g(\nabla_{st}) \quad (8)$$

其中, R_i 和 R_j 是两个邻接区域,同时 R_i 和 R_j 的类别标号不同; $R_k = R_i \cup R_j$; NR_i 表示区域 R_i 的边界点的集合; η_s 表示 s 点的邻域系统^[2]。当 δE 为负数时,即区域合并前后能量减少,表示区域 R_i 和 R_j 可以合并,否则不能合并。

2 实验结果与分析

2.1 评价指标

评价海冰图像分割效果常用的两个度量指标是分割精度和 Kappa 系数^[9]。分割精度是指正确划分像素的百分比。Kappa 系数定义如下:

$$k = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad (9)$$

式中, $P(A)$ 为观测一致率, $P(E)$ 为期望一致率。Kappa 系数的范围为 $[-1, 1]$ 。

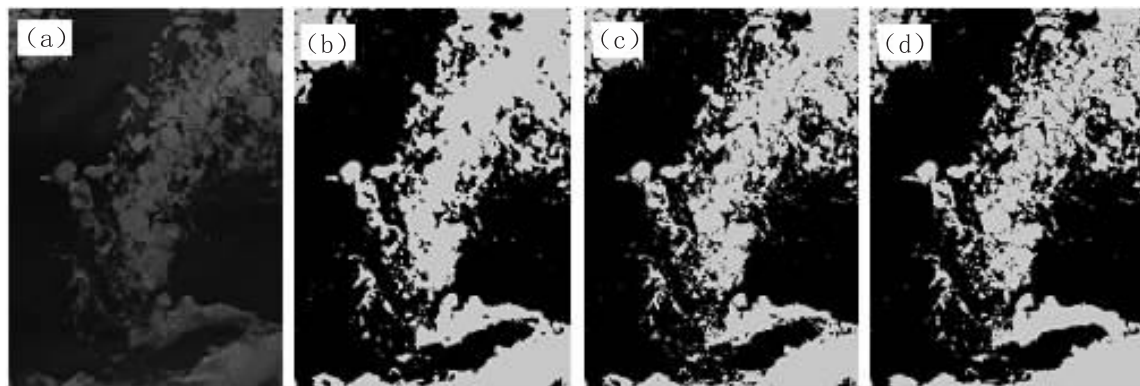
2.2 实验数据

为验证本文提出的算法的有效性,选择两幅不同的海冰 SAR 图像,应用基于区域的 MRF 分割算法和本文提出的算法进行分割测试,结果如图 3,图 4 和表 1 所示。两幅测试图像中第一幅是由 Radarsat-1 模式于 2003 年 2 月 18 日采集的 S. Laurence Bay 图像,包括初期冰和平滑冰两类,如图 3(a)所示;第二幅由 Radarsat-1 模式于 2006 年 11 月 27 日在 Beaufort 海上空采集,包含初期冰和平滑冰两类,如图 4(a)所示。

对比图 3 中(b)(c)和图 4 中(b)(c)可知,

基于区域的 MRF 分割算法出现了海冰类型误分的情况,即原属于平滑冰的区域被错误地划分为初期冰,同样,原属于初期冰的区域也被错误地划分为平滑冰。而且定性地看,对于 Beaufort 海冰 SAR 图像,基于区域的 MRF 算

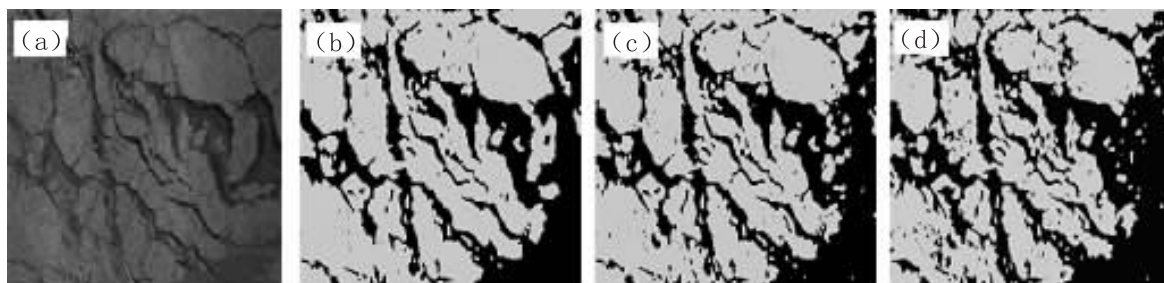
法的分割结果(图 4(b))显示出了更多的歧义性,特别是在中、右区段,而本文提出的分割算法的分割结果(图 4(c))具有更好的区域连通性,在同样的区域能够比较好地兼顾边界位置定位和区域一致性,图像中孤立区域明显减少。



(a)原始海冰 SAR 图像;(b)基于区域的 MRF 算法分割结果;(c)本文算法分割结果;(d)地面实况图

■ 初期冰; ■ 平滑冰

图 3 S. Laurence Bay 海冰 SAR 图像分割的结果



(a)原始 SAR 海冰图像;(b)基于区域的 MRF 算法分割结果;(c)本文算法分割结果;(d)地面实况图

■ 初期冰; ■ 平滑冰

图 4 Beaufort 海冰 SAR 图像分割的结果

表 1 两种分割算法对海冰 SAR 图像进行分割的效果比较

方法	S. Laurence Bay 海冰 SAR 图像				Beaufort 海冰 SAR 图像			
	分割精度 (%)	Kappa 系数	分割数	所用时间 /s	分割精度 (%)	Kappa 系数	分割数	所用时间 /s
基于区域的 MRF 算法	76.89	0.748 6	29 153	23	80.64	0.776 4	35 485	25
本文算法	81.63	0.796 5	14 686	12	87.75	0.857 3	16 457	18

由表 1 可知,对于 S. Laurence Bay 海冰 SAR 图像,基于区域的 MRF 分割算法的 Kappa 系数是 0.748 6,精度为 76.89%,而本文提出的分割算法 Kappa 系数是 0.796 5,精度为 81.63%;对于 Beaufort 海冰 SAR 图像,基于区域的 MRF 分割算法的 Kappa 系数是 0.776 4,精度为 80.64%,而本文提出的分割算

法 Kappa 系数是 0.857 3,精度为 87.75%。数据表明本文算法更有效地实现了海冰 SAR 图像的准确分割。

本文算法利用 Gibbs 采样标记实现了海冰 SAR 图像的准确分割,克服了分割特征鲁棒性差的问题,并从特征的鲁棒性和分割过程的自适应性两方面提高了对 SAR 海冰图像结构的

认知能力。另外,从表1还可以看出,本文提出的分割算法与基于区域的 MRF 分割算法相比,大幅度减少了分割区数目,从而降低了计算量,节省了计算时间。

3 结论

本文针对 Radarsat-1 获取的海冰 SAR 图像提出了一种新的分割算法,该算法经由像素到区域再到大尺度区域这一途径,把区域化、Gibbs 采样标记以及区域合并等操作组合起来实现对海冰 SAR 图像的分割。将本文算法运用到由 Radarsat-1 所获取的两幅真实海冰 SAR 图像进行测试,结果表明,在精确定位边界和生成较大均匀区域方面该算法具有优越性,同时证明了该算法的可行性和准确性,这为实现海冰 SAR 图像的准确分割提供了一条新途径。

参考文献:

- [1] BRYANT T G, MORSE G B, NOVAK-LM, et al. Tactical radars for ground surveillance[J]. The Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 341 - 354.
- [2] YANG X Z, CLAUSI D A. SAR sea ice image segmentation based on edge-preserving watersheds [C]. Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'07). Montreal Quebec, Canada, 2007.
- [3] CLAUSI D A, YUE B. Comparing co-occurrence probabilities and Markov random fields for texture analysis of SAR sea ice imagery[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(1): 215 - 228.
- [4] YU Q, MOLONEY C, WILLIAMS F M. SAR sea-ice texture classification using discrete wavelet transform based methods [C]. Proceeding of the 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002), 2002: 3041 - 3043.
- [5] TSATSOLIS S K. Texture analysis of SAR sea ice imagery using grey level co-occurrence matrices[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2): 780 - 795.
- [6] VINCENT L, SOLILLE P. Watershed in digital spaces: and efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583 - 598.
- [7] 赵庆平,姜恩华,李素文. 带有纹理保护的 SAR 海冰图像分割[J]. 安徽大学学报, 2014(3): 61 - 67.
- [8] 赵庆平,李峥,侯俊钦. 朗伯定律的宽观测带 SAR 海冰图像分割[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 67 - 71.
- [9] YANG X Z, CLAUSI D A. SAR sea ice image segmentation based on edge-preserving watersheds[M]. Montreal, Canada: Proc. of the 4th Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'07), 2007: 426 - 431.

(责任编辑:李秀荣)